

Influenza del modello della linea nella determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti

Zoppetti, N. Andreuccetti, D.

IFAC-CNR (Istituto di Fisica Applicata Nello Carrara del Consiglio Nazionale delle Ricerche)
via Madonna del Piano 10 - 50019 Sesto Fiorentino (FI)
N.Zoppetti@ifac.cnr.it, D.Andreuccetti@ifac.cnr.it

A) INTRODUZIONE

Le fasce di rispetto degli elettrodotti, come definite dalla legge n.36 del 2001 e dal relativo decreto attuativo (DPCM 8 luglio 2003), sono uno strumento fondamentale per la pianificazione del territorio. Nei documenti tecnici provvisori in cui viene descritto l'algoritmo da utilizzare per la loro determinazione, si prende di regola in considerazione la rappresentazione della linea basata sulla guida CEI 211-4 [1] e quindi costituita da conduttori rettilinei ed indefiniti. Al più, si accenna all'opportunità di utilizzare un modello tridimensionale più evoluto nel solo caso in cui siano presenti contributi significativi al campo magnetico originati da più linee non parallele.

Di fatto, non sono rare le situazioni in cui, anche in presenza di una sola linea elettrica, gli algoritmi che utilizzano conduttori rettilinei ed indefiniti non rappresentano la realtà in modo soddisfacente.

Prendendo in considerazione un certo numero di casi tipici, che si riferiscono a linee esistenti, si presentano vari approcci alla determinazione delle fasce di rispetto. Si parte dai modelli che utilizzano conduttori rettilinei ed indefiniti, per arrivare alla rappresentazione mediante catenarie [2], passando per soluzioni intermedie che utilizzano segmenti e semirette conduttrici. Si confrontano quindi i risultati ottenuti con i diversi modelli, per evidenziarne vantaggi e limiti in funzione del contesto considerato.

B) MODALITÀ DI CALCOLO E STRUMENTI PER LA VISUALIZZAZIONE DEI RISULTATI

Per valutare le differenze tra i diversi approcci alla modellazione di elettrodotti, ci si riferisce nel seguito ad uno schema comune. Secondo tale schema, per determinare la fascia di rispetto relativa ad una specifica linea, si procede lungo di essa considerando dei piani di calcolo verticali opportunamente orientati denominati nel seguito "sezioni". Per ogni campata vengono considerate più sezioni, sia presso i sostegni sia lungo le campate. Su ciascuna sezione, si eseguono i calcoli e si determinano gli estremi della fascia di rispetto. Come descritto nei vari documenti tecnici provvisori, ci si svincola dall'andamento del terreno, considerando la proiezione sul generico piano orizzontale del volume caratterizzato da livelli di induzione magnetica superiori a $3 \mu\text{T}$.

La fascia di rispetto si riferisce comunque ad una sola linea, anche quando si considerano come sorgenti più elettrodotti indipendenti. La linea per cui si vuole di volta in volta determinare la fascia di rispetto viene denominata nel seguito come *linea principale*, le altre come *linee secondarie*.

Per presentare i risultati si utilizzano due tipi di visualizzazione: una sul piano orizzontale ed una sul piano verticale. L'andamento della fascia di rispetto sul piano orizzontale viene ricostruito congiungendo gli estremi determinati su ciascuna sezione. Nel caso più linee siano presenti nella stessa area, la fascia di rispetto complessiva si ottiene mediante l'unione delle regioni comprese entro le fasce di rispetto calcolate considerando ciascuna delle linee come linea principale.

Per la visualizzazione sul piano verticale si prende come riferimento una particolare sezione. Su questa si traccia per punti la curva di livello a $3 \mu\text{T}$, utilizzando i diversi modelli di elettrodotto presi in considerazione. L'ampiezza della fascia di rispetto sulla sezione considerata è data dalla proiezione sull'asse orizzontale della curva di livello così determinata.

C) MODELLI DI ELETTRODOTTO CONSIDERATI

Di seguito sono descritti i modelli di elettrodotto che verranno poi messi a confronto.

1) CONDUTTORI RETTILINEI ED INDEFINITI

Questo approccio alla modellazione vuole rappresentare quanto viene fatto da un operatore che utilizza gli algoritmi di calcolo descritti dalla norma CEI 211-4. Occorre sottolineare come l'applicazione di questo modello al caso di linee con cambi di direzione pronunciati o di più elettrodotti non paralleli, rappresenta comunque una forzatura, giustificata dalla necessità di eseguire il confronto con gli altri modelli in situazioni particolari.

I conduttori rettilinei ed indefiniti orizzontali considerati su ciascuna sezione di calcolo, passano per i punti di intersezione delle catenarie con il piano della sezione stessa. Lungo le campate le sezioni non sono necessariamente ortogonali all'asse della linea principale mentre i conduttori rettilinei sono sempre paralleli all'asse della linea per cui si vuole determinare la fascia di rispetto. In ogni caso, tutti i conduttori rettilinei ed indefiniti sono paralleli tra loro in modo da permettere la diretta applicazione dell'algoritmo descritto nella norma CEI 211-4.

Presso i sostegni la sezione di calcolo giace sul piano verticale che biseca l'angolo formato dalle campate ed i conduttori rettilinei sono ad esso ortogonali. Nel caso si considerino più linee, i conduttori rettilinei ed indefiniti che rappresentano le linee secondarie passano per il punto di intersezione tra le relative catenarie ed il piano di calcolo e sono paralleli ai conduttori rettilinei della linea principale.

2) SEMIRETTE E SEGMENTI

I conduttori vengono rappresentati con semirette e segmenti. Presso i sostegni i conduttori delle campate che condividono il sostegno considerato vengono rappresentati con delle semirette. Le semirette non sono in genere ortogonali alla sezione di calcolo, ma sono orizzontali e parallele all'asse della campata che rappresentano. Presso i punti intermedi i conduttori della campata che interseca la sezione di calcolo vengono rappresentati con dei segmenti che uniscono i relativi punti di sospensione, mentre i conduttori delle campate a monte e a valle vengono rappresentati con delle semirette. Nel caso si considerino linee secondarie, per ciascuna di esse si rappresenta la campata più vicina alla sezione di calcolo con un fascio di segmenti conduttori che uniscono i relativi punti di sospensione, mentre i conduttori delle campate a monte e a valle vengono rappresentati con delle semirette.

Tale approccio costituisce un'alternativa al modello completo che utilizza le catenarie: la semplicità del modello rende la fase di calcolo molto meno onerosa. Ciò può essere quantificato in termini di tempo con un fattore in genere maggiore di 10 e che comunque dipende da quanto dettagliata è la rappresentazione di ciascuna catenaria.

3) CATENARIE

I conduttori delle linee vengono modellati una volta per tutte con le relative catenarie. Per non allungare eccessivamente i tempi di calcolo, è sufficiente considerare solamente le catenarie delle campate che contribuiscono al campo totale per più di una frazione significativa del valore di induzione magnetica ($3 \mu\text{T}$) a cui si riferisce la fascia di rispetto.

D) CALCOLO DELLE FASCE DI RISPETTO E CONFRONTO FRA I MODELLI CONSIDERATI

Per analizzare le differenze tra i differenti approcci alla modellazione considerati, ci si riferisce a due linee a 132 kV che attraversano la periferia ovest di Firenze da nord a sud. Tale scelta è stata effettuata in virtù del fatto che per tali linee si dispone di un modello molto accurato, costruito a partire dai dati tecnici forniti dal gestore, integrati con quelli ricavati durante alcuni sopralluoghi. Inoltre, le caratteristiche degli elettrodotti considerati sono ideali per portare al limite e confrontare i diversi approcci alla modellazione. Le linee hanno inizialmente tracciati indipendenti, quindi si incrociano e corrono parallele ed infine presentano un tratto in doppia terna. In particolare poi, sia nei tratti a semplice terna sia in quelli a doppia terna, i tracciati presentano cambi di direzione pronunciati.

I casi discussi sono stati scelti in modo che il paragone tra i diversi modelli considerati risultasse significativo. In particolare, sono stati trascurati i casi in cui era scontata l'equivalenza tra i risultati ottenuti con i diversi modelli, come, ad esempio, quello di un tratto rettilineo di linea semplice terna.

Per effettuare i calcoli si è sempre supposto che la corrente sulle linee fosse pari a 870 A, come specificato dalla norma CEI 11-60 [3] per il conduttore di riferimento e linee a 132 kV. Nel caso di più elettrodotti, sono stati utilizzati i reali rapporti di fase tra le correnti sui conduttori.

1) LINEA SEMPLICE-TERNA CON CAMBIO DI DIREZIONE PRONUNCIATO

In fig. 1 e fig. 2 sono rappresentati i risultati del calcolo nel caso di un cambio di direzione di 78° di una linea semplice terna. In entrambe le figure si nota come sia il modello che utilizza segmenti e semirette sia quello con catenarie rappresentano correttamente la distribuzione di campo ed in particolare gli effetti del cambio di direzione della linea. Utilizzando il modello con conduttori rettilinei ed indefiniti invece, sul piano orizzontale la distribuzione risulta centrata sull'asse della linea mentre sul piano verticale la curva di livello a $3 \mu\text{T}$ risulta essere un cerchio centrato nel baricentro delle intersezioni dei conduttori con il piano della sezione.

2) LINEE IN DOPPIA TERNA CON CAMBIO DI DIREZIONE PRONUNCIATO

Il caso di linee in doppia terna, illustrato nelle fig. 3 e fig. 4, è sostanzialmente analogo al precedente e si riferisce ad un angolo di circa 84° . Anche in questo caso si può notare che utilizzando il modello a semirette e segmenti si ottengono risultati quasi indistinguibili da quelli ottenuti con il più complesso modello a catenarie. I piccoli scostamenti apprezzabili sono dovuti al fatto che i segmenti che uniscono i punti di sospensione si trovano sempre a quota maggiore o uguale rispetto alle relative catenarie. Questo effetto è di piccola entità presso i sostegni ma, come mostrato in seguito, è ben più evidente al centro delle campate.

Figura 1 – Fascia di rispetto per una linea semplice terna presso un cambio di direzione pronunciato.

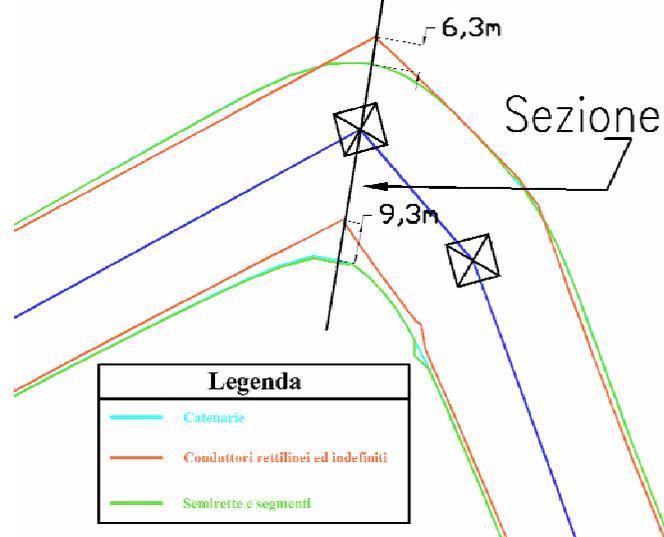


Figura 2 – Curva di livello a $3 \mu\text{T}$ sulla sezione evidenziata in fig. 1

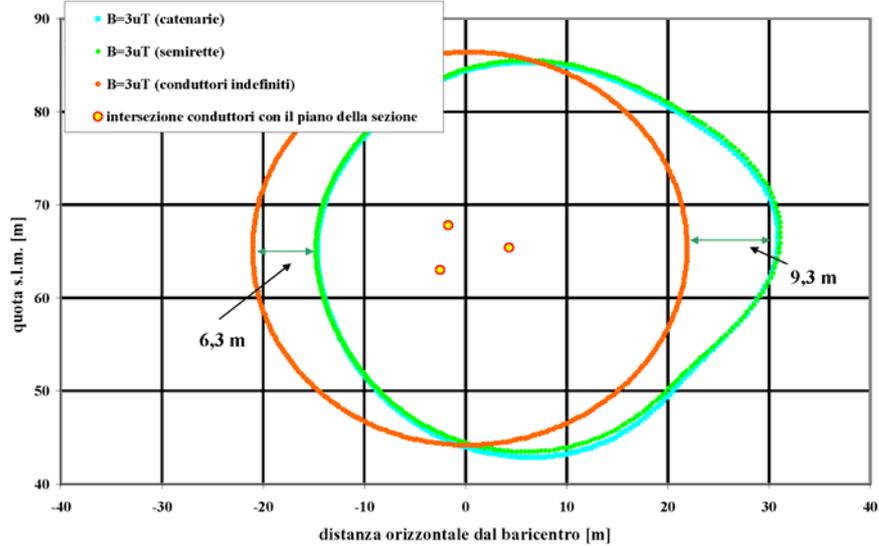


Figura 3 – Fascia di rispetto per un elettrodotto in doppia terna presso un cambio di direzione pronunciato

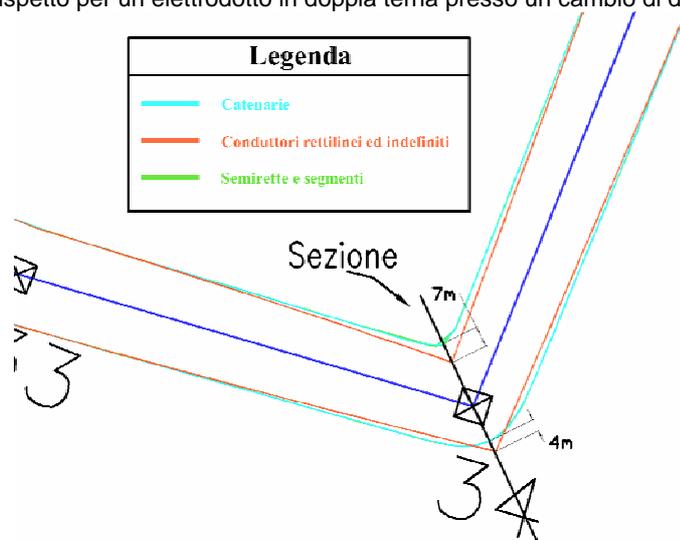
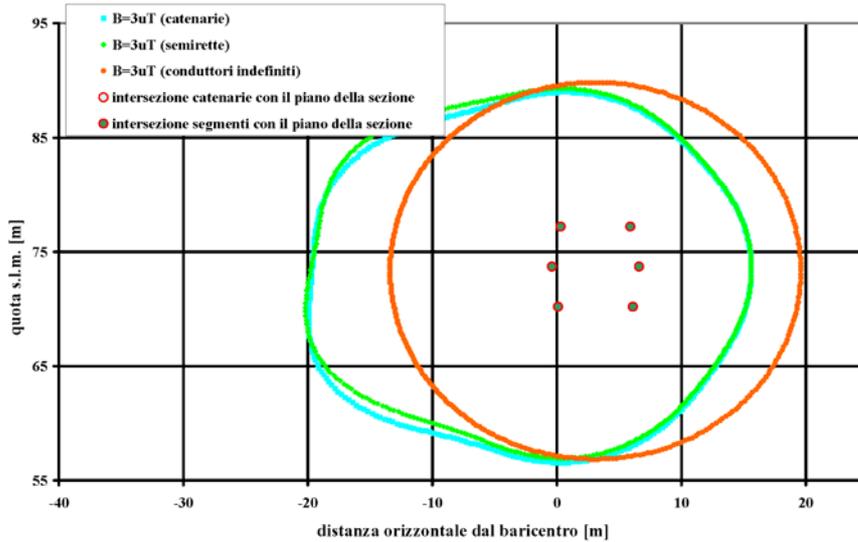


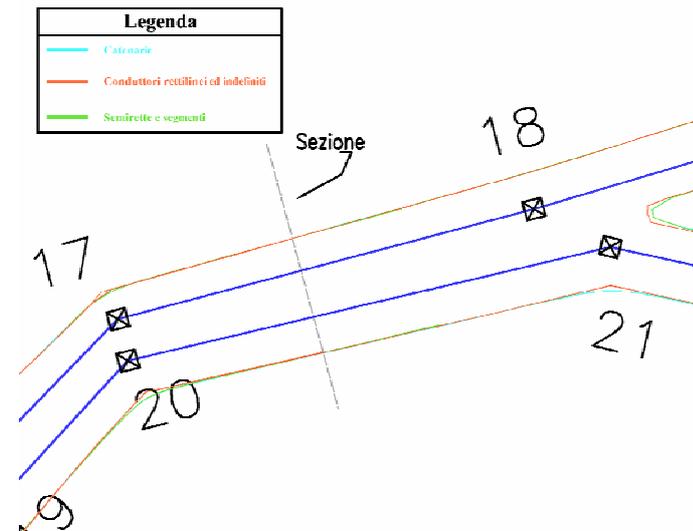
Figura 4 – Curva di livello a $3 \mu T$ sulla sezione evidenziata in fig. 3



3) DUE LINEE SEMPLICE TERNA PARALLELE FRA LORO

Nelle fig. 5 e fig. 6 sono rappresentati i risultati nel caso di due linee a semplice terna con campate parallele tra loro. In particolare in fig. 5 si può notare che i diversi modelli danno luogo, al centro della campata, a dei limiti di fascia indistinguibili alla scala utilizzata e comunque con differenze inferiori a 0,5 m.

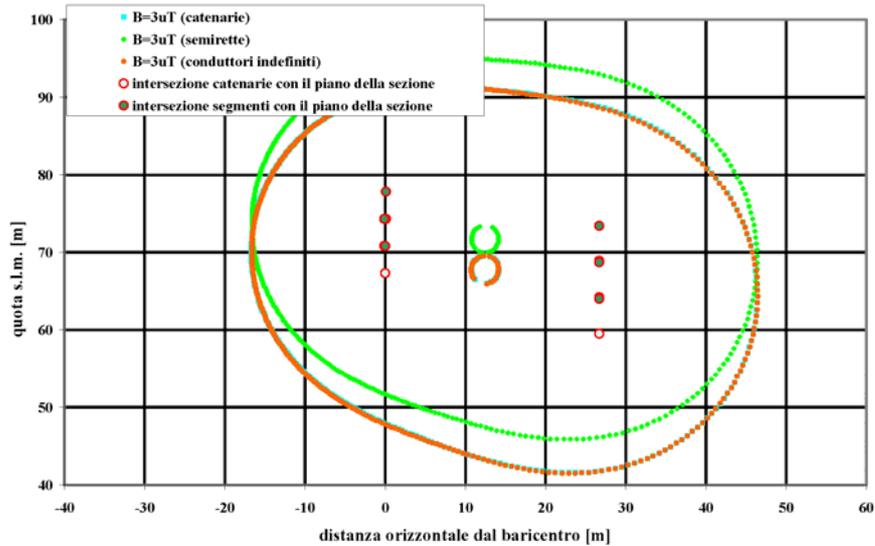
Figura 5 – Fascia di rispetto per due linee semplice terna parallele



In fig. 6 si può osservare invece che il modello a conduttori indefiniti dà risultati molto simili a quelli ottenuti utilizzando le catenarie, mentre la distribuzione di campo determinata con il modello a semirette e segmenti ha un andamento analogo ai precedenti, ma spostato di oltre tre metri più in alto. L'origine di tale fenomeno si spiega osservando la posizione delle intersezioni dei conduttori con il piano della sezione e ricordando che i conduttori rettilinei ed indefiniti passano per le intersezioni delle catenarie con il piano di calcolo. Al centro di campate senza grandi dislivelli la freccia (la distanza tra la catenaria ed il segmento che unisce i punti di sospensione) assume valori prossimi al massimo. In questo caso la freccia massima assume valori leggermente differenti per le due campate a causa della loro diversa lunghezza. In particolare per la campata più lunga la freccia massima è di oltre 4,5m mentre per la campata più corta si arriva a 3,5m. Tali differenze di quota si possono osservare sia relativamente alle intersezioni dei conduttori con il piano della sezione sia alle curve di livello a $3 \mu T$.

È da notare anche che circa a metà distanza tra i conduttori delle due linee si viene a formare una piccola zona con induzione magnetica inferiore a $3 \mu T$. Se le linee fossero state più distanti o le correnti meno intense, tale regione sarebbe stata più ampia di quanto si possa osservare in fig. 6. La fascia di rispetto tracciata sulla cartografia rimane comunque unica e comprende entrambe le linee fin tanto che sul piano verticale non si osservano due curve di livello distinte intorno a ciascun fascio di conduttori.

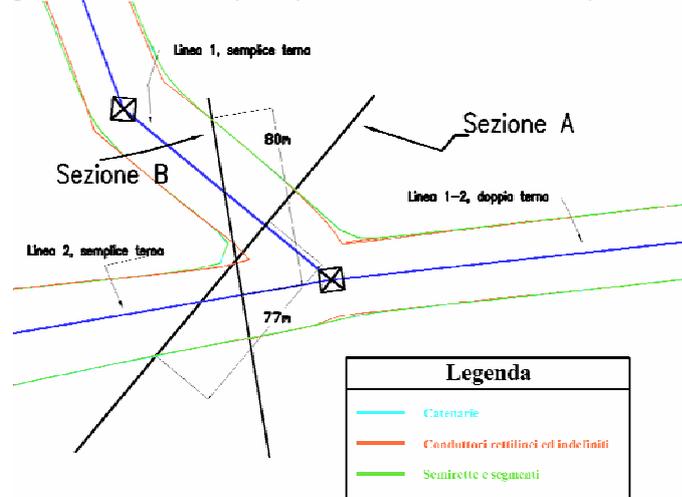
Figura 6 – Curva di livello a $3 \mu T$ sulla sezione evidenziata in fig. 5



4) LINEE NON PARALLELE

In fig. 7 viene preso in considerazione il passaggio di due elettrodotti da struttura a semplice terna con tracciati non paralleli a struttura a doppia terna. Anche in questo caso i risultati ottenuti con il modello a segmenti e semirette sono equivalenti a quelli ottenuti con le catenarie. Il modello con conduttori indefiniti da luogo a delle fasce che si discostano da quelle ottenute con gli altri modelli laddove non può essere determinata univocamente la direzione da assegnare ai fasci di rette che rappresentano i conduttori della linea.

Figura 7 – Fascia di rispetto presso due elettrodotti non paralleli.



Il fatto che in pianta si consideri una fascia complessiva data dall'unione delle regioni comprese entro le due fasce determinate relativamente a ciascuna delle due linee, maschera alcune delle differenze tra le distribuzioni ottenute con i diversi modelli, che invece risultano più evidenti se si analizzano i risultati del calcolo sul piano verticale. In fig. 8 e fig. 9 si osserva come sulle sezioni A e B, evidenziate in fig. 7, utilizzando i conduttori rettilinei ed indefiniti si ottengono due fasce di rispetto separate per le due linee, cosa che invece non accade utilizzando semirette e segmenti o le catenarie. In particolare, la distribuzione ottenuta con i conduttori rettilinei approssima abbastanza bene i risultati ottenuti con i modelli più elaborati solo in prossimità del fascio di conduttori relativo alla linea principale, mentre gli scostamenti sono molto più evidenti intorno alla linea secondaria. Sulla sezione A (fig. 8) si considera la linea 1 come linea principale, viceversa sulla sezione B (fig. 9) la linea 2 è quella principale. Ciò spiega anche come è possibile ottenere in pianta risultati simili a quelli ottenuti con modelli più evoluti, mentre sul piano verticale si osservano differenze molto più marcate.

Figura 8 – Curve di livello a $3 \mu\text{T}$ sulla **sezione A** evidenziata in fig. 7

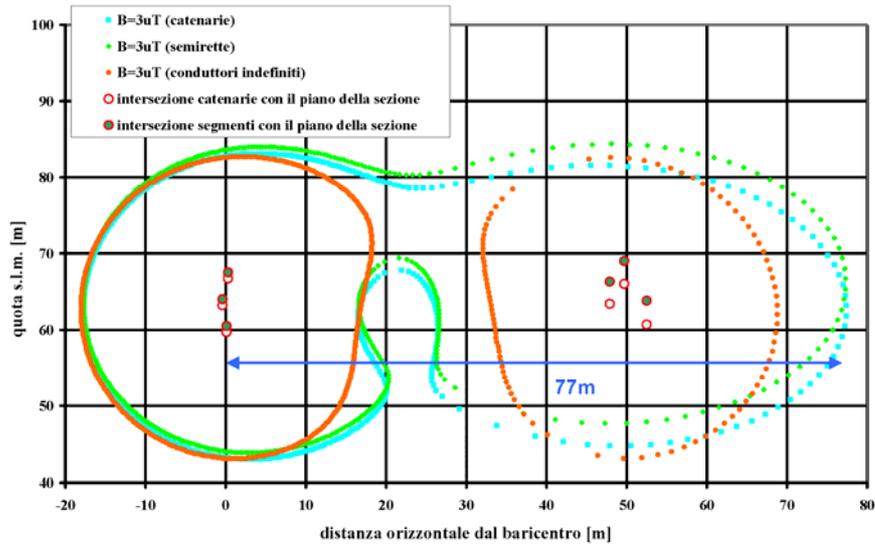
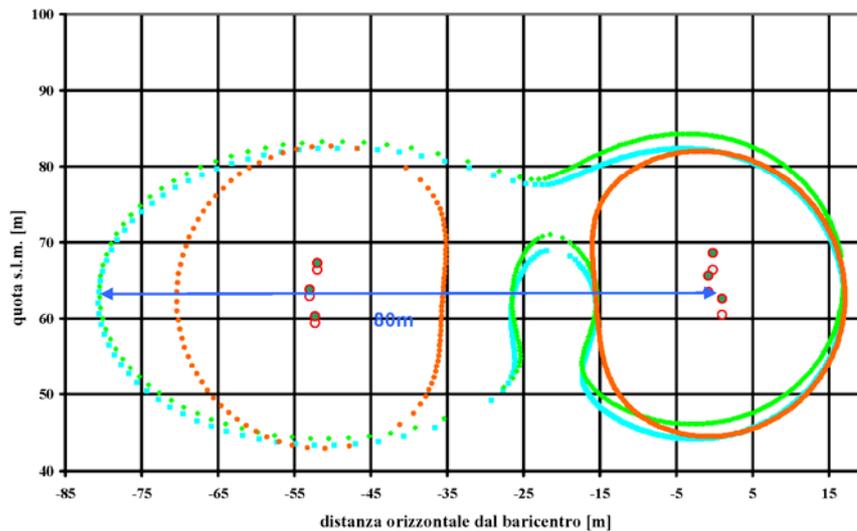


Figura 9 – Curve di livello a $3 \mu\text{T}$ sulla **sezione B** evidenziata in fig. 7



E) CONCLUSIONI

Il modello con conduttori rettilinei ed indefiniti può essere utilizzato per determinare le fasce di rispetto in tutti i casi in cui gli elettrodotto abbiano andamento rettilineo e siano tutti paralleli tra loro. Per situazioni più complesse è indicato l'utilizzo di modelli tridimensionali. Tra questi, il modello a semirette e segmenti è in grado di fornire delle fasce di rispetto sul territorio equivalenti a quelle ottenute con le catenarie. L'analisi della distribuzione di campo sul piano verticale generata da questi ultimi due modelli evidenzia come vi possano essere significativi scostamenti in termini di quota. Tali scostamenti comunque non si riflettono sull'andamento delle fasce, che è determinato mediante delle proiezioni sul piano orizzontale del volume caratterizzato da valori di induzione magnetica superiori a $3 \mu\text{T}$.

Bibliografia

- [1] Comitato Elettrotecnico Italiano, "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche", Norma CEI 211-4, ottobre 1996.
- [2] N.Zoppetti, D.Andreuccetti, "Modellazione dei conduttori di un elettrodotto aereo: la catenaria", Report Tecnico IFAC N. TR/AEL/08.03 ISSN 1120-2823, settembre 2003
- [3] Comitato Elettrotecnico Italiano, "Portata al limite termico delle linee elettriche aeree esterne con tensione maggiore di 100 kV", Norma CEI 11-60, giugno 2002.